

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

08.07.03

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日  
Date of Application: 2002年 7月 8日

REC'D 22 AUG 2003

出 願 番 号  
Application Number: 特願2002-198337

WIPO

[ST. 10/C]: [JP2002-198337]

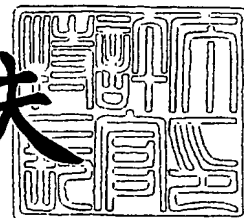
出 願 人  
Applicant(s): 日本板硝子株式会社

PRIORITY DOCUMENT  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

2003年 8月 7日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今井康夫



BEST AVAILABLE COPY

出証番号 出証特2003-306326a

【書類名】 特許願  
【整理番号】 02P237  
【あて先】 特許庁長官 殿  
【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番28号 日本板硝子株式会社内

【氏名】 橘高 重雄

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番28号 日本板硝子株式会社内

【氏名】 大家 和晃

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番28号 日本板硝子株式会社内

【氏名】 奈良 正俊

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番28号 日本板硝子株式会社内

【氏名】 常友 啓司

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市中央区北浜4丁目7番28号 日本板硝子株式会社内

【氏名】 浅井 貴弘

【特許出願人】

【識別番号】 000004008

【氏名又は名称】 日本板硝子株式会社

## 【代理人】

【識別番号】 100069084

【弁理士】

【氏名又は名称】 大野 精市

## 【手数料の表示】

【予納台帳番号】 012298

【納付金額】 21,000円

## 【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9706787

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 フォトニック結晶光導波路

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電磁波の伝搬方向に垂直な少なくとも 1 方向に周期性を有し、前記電磁波の伝搬方向には周期性を有さないフォトニック結晶からなるコアと、該コアに接し、伝搬する前記電磁波を該コアに閉じ込める作用をなすクラッドとを有する光導波路であって、前記光導波路の光入射面に近接もしくは接触して位相変調手段が設けられていることを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項 2】

前記コア部分には、電磁波の伝搬方向におけるフォトニックバンドが存在し、前記位相変調手段によって位相変調された入射光は、そのエネルギーの全部もしくは大部分が最低次ではない特定の前記フォトニックバンドに属する波動として前記コア部分を伝搬することを特徴とする請求項 1 に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 3】

前記コアを伝搬する電磁波は、低次側から 2 番目の結合性フォトニックバンドに属する波動であることを特徴とする請求項 2 に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 4】

前記コアを伝搬した電磁波が出射される前記光導波路の出射面に、近接もしくは接触して位相変調手段が設けられていることを特徴とする請求項 1、2 または 3 に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 5】

前記光導波路は、電磁波の伝搬方向に垂直な少なくとも 1 方向に周期性を有し、前記電磁波の伝搬方向には周期性を有さないフォトニック結晶を、前記クラッドとして用いたことを特徴とする請求項 1～4 のいずれか一項に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 6】

前記位相変調手段は、前記コアと同一の構造と周期を有する位相格子であることを特徴とする請求項 1 または 4 に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 7】

前記位相格子は、前記コアの入射面もしくは出射面近傍に切断面を設け、前記コアの一部を分離して形成したことを特徴とする請求項 6 に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 8】

前記コア部分に、光学的非線形作用を有する活性物質を含有させたことを特徴とする請求項 1 に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 9】

前記フォトニック結晶が、電磁波の伝搬方向に垂直な 1 方向もしくは 2 方向に周期性を有し、前記電磁波の伝搬方向には周期性を有さない多層膜層であることを特徴とする請求項 1～8 のいずれか一項に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 10】

前記光導波路がその断面を略円形とするファイバ状であって、そのコア部分もしくはコア部分およびクラッド部分を構成するフォトニック結晶が、前記断面において電磁波の伝搬方向に平行な軸に対して対称な周期性を有し、前記電磁波の伝搬方向には周期性を有さないことを特徴とする請求項 1～8 のいずれか一項に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 11】

前記フォトニック結晶は、ファイバ状均質物質内に、その長手方向に沿って複数の空洞を設け、該複数の空洞を前記長手方向に平行な軸に対して対称な周期性をもって配置した構造を有することを特徴とする請求項 10 に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 12】

前記空洞部分の全部もしくは一部に流動性物質を充填したことを特徴とする請求項 11 に記載のフォトニック結晶光導波路。

【請求項 13】

前記コア部分もしくはコア部分およびクラッド部分を構成するフォトニック結

晶が、前記断面内の屈折率が前記光導波路の中心軸からの距離に対して周期的かつ同心円状に変化している構造であることを特徴とする請求項10に記載のフォトニック結晶光導波路。

#### 【発明の詳細な説明】

##### 【0001】

#### 【発明の属する技術分野】

本発明は、光通信システム等に用いられる光ファイバ等の光導波路に関し、とくにフォトニック結晶を用いた光導波路に関する。

##### 【0002】

#### 【従来の技術】

近年、ホーリーファイバあるいはフォトニック結晶ファイバと呼ばれる新しい光ファイバの研究開発が急速に進展している。従来の光ファイバでは単純な屈折率差によりコア部分に光を閉じ込めているのに対して、これらのファイバはその断面内に複雑な2次元構造を有することを特徴としている。そのため、光の閉じ込めは、

- ・クラッド部分に空孔を配置することにより実効屈折率を小さくして、コア部分との屈折率差をつける、

- ・クラッド部分をフォトニック結晶として、コア部分の伝搬光に対してフォトニックバンドギャップを形成する、

といった手段によって行なわれている。

##### 【0003】

ホーリーファイバやフォトニック結晶ファイバでは、構造によってその特性を大きく変えることができるので、

- ・波長分散を大きくした分散補償光ファイバ
- ・非線形光学効果の大きい光ファイバ
- ・可視域でのゼロ分散光ファイバ

といった応用が提案されている。また、複雑な2次元構造は、たとえば多数の石英パイプを束ねた状態で加熱延伸することによってつくることができる（例えば、オー・プラス・イー、23巻、9号、1061頁 2001年、参照）。

## 【0004】

## 【発明が解決しようとする課題】

現在提案されているホーリーファイバやフォトニック結晶ファイバでは、コア部分を伝搬する電磁波として、0次モードによる単一モード伝搬を利用している。単一モード伝搬は、多モード伝搬による波長分散を防ぐためには必須の条件であるものの、同時にコアの大きさや光ファイバ性能に対する制約条件ともなっている。

本発明は、このような問題点を解決するためになされたもので、上記制約条件のない平板状光導波路または光ファイバを提供することを目的とする。

## 【0005】

## 【課題を解決するための手段】

本発明のフォトニック結晶光導波路は、電磁波の伝搬方向に垂直な少なくとも1方向に周期性を有し、電磁波の伝搬方向には周期性を有さないフォトニック結晶からなるコアと、このコアに接し、伝搬する電磁波をコアに閉じ込める作用をなすクラッドとを有する。このような光導波路の光入射面に近接もしくは接触して位相変調手段が設ける。

## 【0006】

このコア部分には、電磁波の伝搬方向におけるフォトニックバンドが存在し、前記位相変調手段によって位相変調された入射光は、そのエネルギーの全部もしくは大部分が最低次ではない特定の前記フォトニックバンドに属する波動として前記コア部分を伝搬する。

## 【0007】

上記のように、フォトニック結晶構造をコアとして光導波路を形成し、コア部分への入射光に位相変調を与えることによって特定の高次フォトニックバンドに属する波動のみを伝搬させることができる。これによりフォトニック結晶の機能を効率よく利用する導波路型光機能素子を実現できる。

## 【0008】

このコアを伝搬する電磁波は、低次側から2番目の結合性フォトニックバンドに属する波動であることが望ましい。できるだけ低次の結合性フォトニックバン

ドを利用することにより、電磁波を効率的に伝搬させることができる。

#### 【0009】

さらにコアを伝搬した電磁波が出射される光導波路の出射面にも近接もしくは接触して位相変調手段を有するのが望ましい。コア部分からの出射光にも同様の位相変調を施すことにより、出射光を平面波に変換することができる。

#### 【0010】

上記光導波路のコア周囲を覆うクラッドも、電磁波の伝搬方向に垂直な少なくとも1方向に周期性を有し、電磁波の伝搬方向には周期性を有さないフォトニック結晶であることが望ましい。このようなフォトニック結晶でコアを囲むことにより、伝搬光の閉じ込めを有効に行なうことができる。

#### 【0011】

なお、上記の位相変調手段は、コアと同一の構造と周期を有する位相格子であることが望ましい。これは、コアの入射面もしくは出射面近傍に切断面を設け、コアの一部を分離すると、容易に形成することができる。

#### 【0012】

また、コア部分に、光学的非線形作用を有する活性物質を含有させることができる。これにより、光学的機能を有する光導波路を提供することができる。

#### 【0013】

上記のフォトニック結晶は、電磁波の伝搬方向に垂直な1方向もしくは2方向に周期性を有し、電磁波の伝搬方向には周期性を有さない多層膜層とすることができる。この構成によれば、平板導波路型光機能素子を提供することができる。

#### 【0014】

また、上記の光導波路が、その断面を略円形とするファイバ状であって、そのコア部分もしくはコア部分およびクラッド部分を構成するフォトニック結晶が、前記断面において電磁波の伝搬方向に平行な軸に対して対称な周期性を有し、電磁波の伝搬方向には周期性を有さない構造とすることもできる。これにより、光ファイバ型の光機能素子を提供できる。

#### 【0015】

この場合のフォトニック結晶は、ファイバ状均質物質内に、その長手方向に沿



って複数の空洞を設け、その複数の空洞を長手方向に平行な軸に対して対称な周期性をもって配置することによって実現することができる。この空洞部分の全部もしくは一部に流動性物質を充填することも可能である。

#### 【0016】

またこのようなコア部分もしくはコア部分およびクラッド部分を構成するフォトリック結晶が、断面内の屈折率が光導波路の中心軸からの距離に対して周期的かつ同心円状に変化するように構成することもできる。

#### 【0017】

##### 【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態について具体的に説明する。

図1はY方向にのみ周期性を有する1次元フォトリック結晶1の、周期性のない方向(Z方向)における電磁波(光)の伝搬を模式的に示した断面図である。Y方向は、例えば厚さ $t_A$ の物質A(屈折率 $n_A$ )と厚さ $t_B$ の物質B(屈折率 $n_B$ )を交互に積み重ねた周期 $a = (t_A + t_B)$ の構造とする。

#### 【0018】

図1において、フォトリック結晶1の端面1aから真空中の波長 $\lambda_0$ の平面波の入射光2を入射させたとき、この光が多層膜内でどのように伝搬するかは、フォトリックバンドを計算し図示することにより知ることができる。バンド計算の方法は、例えば"Photonic Crystals", Princeton University Press (1995)あるいは、Physical Review B 44巻、16号、p.8565、1991年、などに詳しく述べられている。

このようなフォトリック結晶1内の伝搬光4は端面1aに対向する端面1bから出射光3として空間に出射される。

#### 【0019】

バンド計算に際しては、図1に示す周期的多層膜5はY方向(積層方向)には無限に続く周期構造を有し、XおよびZ方向(層面の広がる方向)には無限に広がっているものと仮定する。図2、図3は、

$$n_A = 1.44 \quad (t_A = 0.5a)$$

$$n_B = 2.18 \quad (t_B = 0.5a)$$

の層を交互に重ねた周期  $a$  の多層構造体について、 $Z$  軸方向 ( $X$  軸方向も同じ) における平面波法によるバンド計算の結果を、 $TE$  偏光 (図 2) 及び  $TM$  偏光 (図 3) の第 1 ~ 第 3 バンドについて示したものである。ここで、 $TE$  偏光は電場の向きが  $X$  軸方向である偏光を、 $TM$  偏光は磁場の向きが  $X$  軸方向である偏光をそれぞれ表わす。

### 【0020】

図 2、図 3 の横軸は  $Z$  軸方向の波数ベクトル  $k_z$  の大きさであり、縦軸は規格化周波数、

$$\omega a / 2 \pi c$$

である。ここで、 $\omega$  は入射する光の角振動数、 $a$  は構造の周期、 $c$  は真空中での光速である。規格化周波数は、真空中の入射光波長  $\lambda_0$  を用いて、 $a / \lambda_0$  と表わすことができるので、以下では  $a / \lambda_0$  と記述する。 $Z$  軸方向には周期性がないので、図 2、図 3 の横軸にはブリルアンゾーンの境界が存在せず、どこまでも広がっている。

### 【0021】

図 2 に示すように、入射光の真空中の波長が  $\lambda_A$  の場合、フォトニック結晶内では最低次の第 1 バンドに対応する波数ベクトル  $k_{A1}$  が存在する。換言すると、波長

$$\lambda_{A1} = 2 \pi / k_{A1}$$

の波動としてフォトニック結晶内を  $Z$  軸方向に伝播する (以下、第 1 バンド光と呼ぶ)。

### 【0022】

ところが、入射光の真空中の波長が  $\lambda_B$  の場合には、第 1、第 3 バンドに対応する波数ベクトル  $k_{B1}$ 、 $k_{B3}$  が存在する。ここで、第 2 バンドは  $Z$  軸方向の伝播に関して「非結合性」であるため無視される。従って、波長  $\lambda_{B1} = 2 \pi / k_{B1}$  の第 1 バンド光、および波長  $\lambda_{B3} = 2 \pi / k_{B3}$  の波動がそれぞれフォトニック結晶内を  $Z$  軸方向に伝播する。図 2 における第 3 バンドのような、第 1 バンドではない結合性バンドを、以下では一般的に「高次伝播バンド」と呼ぶ。通常、第 2 バンドと第 3 バンドのうち片方は結合性、もう片方は非結合性であり、第 1 バンド

は結合性である。なお、非結合性バンドについての理論は、以下の文献に詳しく記述されている。

K. Sakoda “Optical Properties of Photonic Crystals” Springer-Verlag (2001).

#### 【0023】

ここで、真空中での波長 ( $\lambda_A$ 、 $\lambda_B$ など) を、対応するフォトニック結晶中の波長 ( $\lambda_{A1}$ 、 $\lambda_{B3}$ など) で除した数値を「実効屈折率」と定義する。図2から理解できるように、第1バンド光の規格化周波数  $a/\lambda_0$  (縦軸) と  $kz$  (横軸) はほぼ比例するため、実効屈折率も  $\lambda_0$  の変化に対してほとんど不変である。しかし、高次伝播バンド光は実効屈折率が  $\lambda_0$  により大きく変化し、図2、図3より明らかなように実効屈折率が1未満になることもある。

#### 【0024】

図2、図3のようなバンド図において、バンド曲線を  $kz$  で微分した値(すなわち接線の傾き)が伝播光の群速度となることは良く知られている。第2以上の高次バンドでは、 $kz$  の値が小さくなるにつれて接線の傾きは急速に小さくなり、 $kz=0$  のとき0となる。これは、フォトニック結晶に特有の群速度異常である。フォトニック結晶における群速度異常は極めて大きく、かつ通常の均質物質の分散とは逆(入射光の波長が長くなるにつれて群速度が遅くなる)なので、高次伝播バンド光を利用する導波路や光ファイバができれば、光遅延素子や光通信における分散補償素子などに利用することができる。

#### 【0025】

図4は、1次元フォトニック結晶を用いた光導波路素子19の模式図である。基板13上に均質光導波路17を形成し、その一部に1次元フォトニック結晶で構成された光導波路16を挿入してある。この光導波路素子19の一端に入射光2を結合し、長手方向に高次バンド光を伝搬させれば、フォトニック結晶中を伝搬する高次バンド伝搬光は群速度異常があるので、たとえば光遅延素子として用いることができる。

#### 【0026】

また、図5は2次元フォトニック結晶21をコアとして用いた光ファイバ20

の模式図である。2次元構造であっても、構造のない長さ方向の伝播に関しては、上述した1次元フォトニック結晶の場合と同様なバンド図が得られる。したがって、高次バンド光を2次元フォトニック結晶で構成されたコア部分に伝搬させれば、例えば強力な分散補償効果を有する光ファイバとすることができる。

#### 【0027】

しかし、図4あるいは図5に示す構成を、実際に高次伝搬バンド光の光導波路、もしくは光ファイバとして用いるには、いくつかの問題点がある。図2、図3から明らかなように、高次伝搬バンド光が伝搬する場合には必ず第1バンドによる波動も伝搬している。第1バンド伝搬光は、高次伝搬バンド光を利用しようとする場合にはエネルギーの損失であり、入射光の利用効率を大きく低下させてしまうのみならず、高次バンドによる伝搬光とは群速度が異なるので、信号に大きな波長分散が生じてしまう。

#### 【0028】

また、伝搬光が出射する端面にはY軸方向、X軸方向の周期構造が露出しており、高次伝搬バンド光自体も後述するように強度と位相の周期性を有するため、出射光はいろいろな次数と方向の回折光が混在したものとなる。したがって、出射光の取り扱いが困難である。

#### 【0029】

さらに、高次伝搬バンド光の実効屈折率がフォトニック結晶部分と接する周囲の媒体の屈折率よりも小さくなると、屈折により伝搬光が媒体側に漏れてしまう。特に、高次伝搬バンド光の実効屈折率が1未満になると、媒体を空気としても漏れを防ぐことができなくなる。

#### 【0030】

ところで、本発明者らの研究によって、入射光に位相変調を加えることにより、図1に示すようなフォトニック結晶1内に特定の高次伝搬バンド光のみ伝搬させることが可能であることが明らかとなった。

#### 【0031】

図6及び図7は、物質5aと5bを重ね合わせた1次元フォトニック結晶1（周期a）内での、Z軸方向における伝搬光の電場の強さを模式的に表わしたもの

である。電場の山は実線、谷は点線で表わし、線の太さは振幅の大きさを表わすものとする。

第1バンド光は、図6に示すように電場の振幅が物質5a内と5b内で異なるものの、電場の山と谷はそれぞれZ軸と垂直な平面となるので、平面波に近い伝搬となる。

#### 【0032】

しかし、高次伝搬バンド光は、たとえば図7に示すように電場振幅が0となる「節」が生じ、1周期は2つの領域に分割される。隣り合う領域では波動の位相が半波長ずれているため、山と谷が入れ違いに現われる。このように1周期あたり2個の節が生じるのは第2もしくは第3バンドの場合であり、さらに高次のバンドによる伝搬光では1周期内の節の数がさらに増えて、1周期内での半波長ズレが何回も起こるようになる。

したがって、複数のバンドがともに関与する波長（例えば図2の $\lambda_B$ ）の入射光に対する伝搬光は両者が重なって、複雑な電場パターンを示すことになる。

#### 【0033】

ところで、図8に示すように、Y方向に周期aでおおよそ半波長差を生じる位相格子6を設けて入射光として平面波7を入射させると、図7における高次結合バンド光に類似した電場パターンを空間8に作ることができる。ここに1次元フォトニック結晶1の端面1aを置くと、第1バンドによる伝搬光は発生せず、高次伝搬バンド光のみが生じることが、本発明者らのシミュレーションにより明らかとなった。

#### 【0034】

以上の結果を一般化すると、

「フォトニック結晶に対して、フォトニック結晶の周期構造と同じ方向に同じ周期を有する適当な位相変調波を入射させると、特定のバンドに属する伝搬光のみを得ることができる」

ということになる。

#### 【0035】

また、光路を逆に考えると、特定のバンドに属する伝搬光が多層膜層の端面か

ら出射された後に、同様な位相変調手段を設置することにより、平面波に戻すこともできることがわかる。図9に示すように入射側の位相格子6aと同じ位相格子6bをフォトニック結晶1の出射側に設けることにより、出射光を平面波9に変換することができる。

#### 【0036】

以下、位相変調手段の条件について具体的に説明する。

最も簡便な位相変調手段は、周期的多層膜層と同じ周期を有する位相格子である。たとえば、図10に示すように物質5cと5dが周期的に積層された位相格子6を設置すれば良い。本発明者らのシミュレーションによると、位相格子の仕様（図10における物質5cと5dの厚さ $t_C$ 、 $t_D$ 、位相格子6の光軸方向の長さL、空間8の厚さGの値など）は、周期的多層膜5の特性（物質5aと5bの厚さ比率と屈折率など）に合わせて最適化する必要がある。また、位相格子と多層膜の周期は同調させる必要があるので、

$$t_A + t_B = t_C + t_D$$

の各条件を満たし、かつ物質5aと5cのY方向中心、および物質5bと5dのY方向中心はそれぞれ一致していることが必要である。

#### 【0037】

位相格子6と周期的多層膜5の間の空間18の厚さGも伝搬光に影響するので最適な範囲を選ばなくてはならない。

また、多層膜の周期aが真空中の光の波長 $\lambda_0$ 以下である場合は、両者の間隙を空気層とすると位相格子による±1次回折光が伝搬できなくなり、反射光が多くなる。これを防ぐためには、空間18を図のように屈折率の大きい媒体で満たす方法がある。具体的には、満たす媒体の屈折率 $n_G$ を

$$\lambda_0 / n_G < a$$

とすればよい。

#### 【0038】

実際に本発明を実施するにあたっては、周期的多層膜の端面近くに溝を形成して多層膜の一部をそのまま位相格子として用いる方法が考えられる。この場合は、位相格子の厚さと溝の幅を調整して特定の高次伝搬バンド光のみが伝搬するよ

うにしなくてはならない。もちろん、溝は空気層としても良いし、均一媒体で満たしても良い。

#### 【0039】

図5に示すような2次元フォトニック結晶ファイバの場合でも、位相格子を2次元構造とすることによって同様な効果を生じるので、特定の高次バンド光のみによる伝搬を実現することができる。

#### 【0040】

上述したように、高次伝搬バンド光の実効屈折率がフォトニック結晶に接する媒体の屈折率よりも小さくなると、屈折による伝搬光の漏れが発生する。特に、高次結合バンド光の実効屈折率が1以下になると、媒体を空気としても漏れを防ぐことができなくなる。

#### 【0041】

伝搬光の逃げ出しを防いで閉じ込めるためには、例えば図11に示すようにフォトニック結晶1の周囲に金属膜などの反射層10を設ければよい。しかし、反射層による多層膜強度の低下や反射率の不足による減衰等の問題がある場合は、図12に示すように、周期あるいは構造の異なるフォトニック結晶11により閉じ込めを実現することができる。

#### 【0042】

図13は、同じ厚さの2層（屈折率は1.00および1.44）を交互に重ねた1次元フォトニック結晶のバンド図を、2種類の周期（周期 $a$ および周期 $a' = 0.434a$ ）について同じスケールで2次的に示したものである。縦はY軸方向で上下の境界線は中心から $\pm\pi/a$ もしくは $\pm\pi/a'$ の範囲（第1ブリルアンゾーン）を表わす。横はZ軸方向（X軸方向も同じ）であり、周期性がない方向なのでブリルアンゾーンの境界線は存在せず、図の両端は計算した範囲を示す便宜的なものである。ブリルアンゾーン内での位置はフォトニック結晶内での波数ベクトルを、等高線状の曲線は特定の規格化周波数 $a/\lambda_0$ （もしくは $a'/\lambda_0$ ）に対応するバンドを意味する。ちなみに、図2はこの様なバンド図の一部（Z軸の正の部分）のみを取り出して1次的に表記したものである。

#### 【0043】

図13の(A)では、周期  $a$  の1次元フォトニック結晶について、波長  $\lambda_0 = 0.725a$  ( $a/\lambda_0 = 1.38$ ) に対応するバンドを太線で、Z軸方向の伝搬光を表わす波数ベクトルを矢印で表示してある。また、図13(B)には、同じ波長  $\lambda_0 = 0.725a$  ( $a'/\lambda_0 = 0.60$ ) に対応するバンドを太線で示している。

#### 【0044】

図13は、(A)の高次伝搬バンド光の波数ベクトルに対応する(Z成分が同じとなる)バンドが(B)には存在しないことを示している。すなわち、周期  $a$  の結晶中の高次伝搬バンド光は周期  $a'$  のフォトニック結晶側に出ていくことができない。従って、このような条件を満たす周期  $a'$  を選んで伝搬光用の1次元フォトニック結晶(周期  $a$ )の両側に設置すれば、閉じ込めを実現することができる(図12参照)。

#### 【0045】

閉じ込め用フォトニック結晶の材料や構造は、伝搬用フォトニック結晶と異なったものであっても構わないが、多層膜の作製の手間を考えれば同じ材料を用いて周期を小さくすることが望ましい。もちろん、使用する波長域において伝搬光の波数ベクトルに対応するバンドが存在しないことは、バンド計算によって確認して設計する必要がある。

#### 【0046】

なお、図13においては、(A)の第1バンド光に対応するバンドも(B)側に存在しないが、周期  $a'$  や膜構造を調整すれば、第1バンド伝搬光は逃がし、高次伝搬バンド光は閉じ込める、という条件とすることもできるので、第1バンドによる伝搬光を途中で完全に排除することもできる。

#### 【0047】

バンド図による閉じ込めの判定は、無限周期構造を前提としたものであるから、閉じ込め用フォトニック結晶の周期数がたとえば3周期くらいであると、閉じ込めが不十分となり伝搬光が外部に漏れてしまうことがある。もちろん、不必要に周期数を多くすることはコストと多層膜の耐久性や精度の点から好ましくない。実際に必要な最低限の周期数は、実験や電磁波シミュレーションにより決定す



ることが望ましい。

#### 【0048】

これまで述べてきたのは1次元フォトニック結晶内の高次バンド伝搬光を閉じ込める場合であるが、図5に示すような2次元フォトニック結晶光ファイバの場合でも、クラッド用のフォトニック結晶によりコア部分を取り囲むことにより閉じ込めを実現することができる。高次バンド伝搬2次元フォトニック結晶を模式的に表わしたのが図14である。

#### 【0049】

以下、本発明の満たすべき条件をさらに具体的に説明する。

図2には示していないが、第4バインド以上の高次バンドも第2、第3バンドと同様に大きい波長分散を示す。しかし伝搬光のバンドが高次になるに従って、Y軸方向の1周期あたりに存在する波動の「節」が増えるので、位相変調のパターンがより複雑になる。したがって、1周期あたりに2個の節がある第2もしくは第3バンドを高次伝搬バンドとして利用することが最も望ましい。もちろん「非結合性」バンドは利用できないので、望ましいバンドは「最低次から2番目の結合性バンド」ということになる。前述したように、第1バンドは結合性である。

#### 【0050】

また、高次伝搬バンドによる伝搬光ではいわゆる「フォトニック結晶における群速度異常」が生じるため、非線形光学効果の増強作用を起こすことなどが期待されている。本発明では群速度異常がほとんど起こらない第1バンド光にエネルギーを取られることがないので、たとえば多層膜やフォトニック結晶光ファイバのコア部分に非線形光学物質を含ませることによってより大きい光学的非線形性の増強効果を得ることができる。(Optical Fiber Communication 2002/Conference and Exhibit Technical Digest ThK4 (p.468)参照)

#### 【0051】

図4の1次元フォトニック結晶はX軸方向とY軸方向の構造に大きな違いがあるため、偏光方向により実効屈折率や群速度は異なる値となる。これは、図2(T E偏光)と図3(T M偏光)の特性が異なることから明らかである。したがって、本発明における光導波路の偏光モードによる差をなくすには、修正用の複屈

折素子を光路の途中に挿入することが考えられる。複屈折素子としては、複屈折結晶、構造的複屈折素子、フォトニック結晶などを用いることができる。

#### 【0052】

本発明に用いるフォトニック結晶の材料としては、使用波長域における透明性が確保できるものであれば特に限定はないが、1次元の場合には一般的に多層膜の材料として用いられていて耐久性や製膜コストの点で優れたシリカ、窒化シリコン、シリコン、酸化チタン、酸化タンタル、酸化ニオブ、フッ化マグネシウムなどが適する材料である。上記材料は、スパッタリング、真空蒸着、イオンアシスト蒸着、プラズマCVDなどの良く知られた方法により、容易に多層膜とすることができる。2次元フォトニック結晶ファイバの場合には、石英ファイバに空気孔を並べたものが最も簡単である。

#### 【0053】

フォトニック結晶を構成する複数の材料間の屈折率比は大きくなるほど、波長分散なども大きくなる傾向があるので、そのような特性が必要な用途に対しては高屈折率材料と低屈折率材料を組合せることが望ましい。実用的に実現できる屈折率比は、たとえば低屈折率材料として空気（屈折率1）、高屈折率材料としてInSb（屈折率 $n=4.21$ ）を用いると4以上にすることができる（「微小光学ハンドブック」224頁、朝倉書店 1995年、参照）。

#### 【0054】

フォトニック結晶を構成する材料の屈折率比が小さくなると、偏光方向による特性の違いが小さくなる傾向があるので、偏波無依存を実現するためには屈折率比の小さい組合せも有用である。ただし、屈折率比があまり小さくなると変調作用が弱くなり、期待される作用が発揮されないこともあるので、屈折率比として1.2以上確保することが望ましい。

#### 【0055】

導波路部分と位相格子部分を隔てる溝は、多層膜を積層した後に、

レジスト層塗布→パターンニング→エッチング→レジスト層の除去

といった一般的な方法により作製することができる。溝部分の空気もしくは真空を低屈折率材料として利用することもできるし、溝部分に媒体を充填してもよい

。充填する物質としては、有機樹脂、ゾル状態のガラス、熔融状態の半導体材料などを用いることができる。ゾル状態のガラスはゲル化した後に加熱して透明なガラスとすることができる。

材料を適切に選定すれば、本発明の作用は通常使用される  $200\text{ nm} \sim 20\text{ }\mu\text{ m}$  程度の波長範囲で発揮される。

#### 【0056】

##### [応用例1：1次元フォトリック結晶導波路]

図15は、本発明を応用した1次元フォトリック結晶導波路の模式図である。

基板13上に形成した均質物質による光導波路17aに、光ファイバなどからの信号光を入射光2として結合する。この信号光は光導波路17aから線状の1次元フォトリック結晶1で構成した光導波路16に送り込まれる。この光導波路16は、たとえば基板13上に周期的多層膜を成膜してから、エッチングによって線状部分だけを残すことによって作製することができる。フォトリック結晶光導波路16の始端には溝18aが設けてあり、この溝18aにより隔てられた部分が位相格子6aとして作用するので、光導波路内では高次バンド光のみ伝搬する。

#### 【0057】

高次バンド伝搬光は、フォトリック結晶光導波路16の終端で溝18bによって1次元フォトリック結晶1を区切って作製した位相格子6bによって再び平面波に変換され、均質材料による光導波路17bを通過して出射され、出射光3は光ファイバ等に結合される。なお、図15では偏光モードによる位相のズレを補償するために、光導波路内に複屈折素子14を挿入している。

#### 【0058】

高次バンド伝搬光は前述したように入射光の波長によって群速度が大きく変化するので、

- ・光通信用信号光の分散補償
- ・光遅延素子

といった用途に用いることができる。また、前述したように群速度の遅い伝搬光には非線形光学効果を増強する作用があるので、

- ・ フォトニック結晶導波路部分に、非線形光学作用を示す物質を微粒子状にしてドーピングする、
  - ・ フォトニック結晶導波路部分の1周期ごとに、非線形光学作用を示す物質を含む薄膜層を設置する、
  - ・ フォトニック結晶導波路を形成する物質そのものを、非線形作用のあるものとする、
- などの手段により、従来あるものよりもはるかに非線形光学効果の大きい素子とすることができる。

#### 【0059】

また、偏光モードによる位相差を補償する手段として、図16に示すように図15に示した光導波路素子29を2個用い、入射側の素子29aに対して出射側の素子29bを90°回転して接続してもよい。この場合、図のように入射側光導波路素子29aの出射側均質導波路および出射側光導波路素子29bの入射側均質導波路は省いてもよい。

#### 【0060】

図15に示す1次元フォトニック結晶導波路16部分は、図14(a)に示すように、Y軸方向に加えてX軸方向にも周期性のある2次元フォトニック結晶とすることもできる。この場合、構造の最適化を行えば偏光モードによる差をなくすることも可能となる。もちろん、溝の設置による位相格子も2次元構造となる。

フォトニック結晶の2次元化は、図14(b)に示すように、多層膜層にエッチングなどの手段でZ軸方向の平行溝を形成すれば容易に実現することができる。

#### 【0061】

##### [応用例2：フォトニック結晶光ファイバ]

図17は、本発明によるフォトニック結晶光ファイバの模式図である。

光ファイバ30本体は、2次元構造を有するコア部分21と、その周囲のクラッド部分22から構成される。光ファイバ30の両端には、コア部分の周期に合わせた位相格子26a、26bが設置されており、入射光（平面波、図示しない

)はコア部分を高次バンド光として伝搬し、出射端で再び平面波に復元される。両端の位相格子は同じものなので、どちらの方向にも用いることができる。

#### 【0062】

光ファイバ30のクラッド部分22のフォトニック結晶は、コア部分21のフォトニック結晶と異なる周期や構造を有し、コア部分の伝搬光をフォトニックバンドギャップによって閉じ込める役割をなす。

#### 【0063】

本光ファイバの伝搬光は高次バンドによるものなので、最低次バンドによる単一モード伝播を用いる従来の光ファイバよりもはるかに大きい群速度異常が発生する。したがって、強力な分散補償効果や非線形光学効果を発揮することができる。

また、コア部分は周期構造であり大きさに制限がないので、大口径のコアを容易に実現することができ、ファイバ間接続を簡略にすることもできる。

#### 【0064】

##### [応用例3：同心円状フォトニック結晶光ファイバ]

図18は、本発明による同心円状フォトニック結晶光ファイバの模式図である。

光ファイバ40本体は、半径方向に周期的な屈折率分布を有する、同心円状のコア部分41及びクラッド部分42により構成される。光ファイバ40の両端には、コア部分の周期に合わせた位相格子46a、46bが設置されており、入射光（平面波、図示しない）はコア部分を高次バンド光として伝搬し、出射端で再び平面波に復元される。両端の位相格子46a、46bは同じものなので、入射の方向は上記と逆方向であってもよい。

#### 【0065】

クラッド部分42は、コア部分41と異なる周期を有し、コア部分の伝搬光をフォトニックバンドギャップによって閉じ込める役割をなす。

この光ファイバ40は光軸対称の構成なので、偏光モードによる差が生じないという長所がある。群速度異常による効果や、コア部分の大きさに制限がない点は、応用例2と同様である。

【0066】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、フォトニック結晶中の高次バンド伝搬光を利用した光導波路型素子をつくることができる。したがって、高次バンド伝搬光の群速度異常に起因する分散補償、光学非線形性の増強効果などを利用した光学素子として広く応用することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 1次元フォトニック結晶内における光の伝搬を示す模式図である。

【図2】 1次元フォトニック結晶のTE偏光に対するフォトニックバンド構造を示す図である。

【図3】 1次元フォトニック結晶のTM偏光に対するフォトニックバンド構造を示す図である。

【図4】 1次元フォトニック結晶をコアとする光導波路素子の模式図である。

【図5】 2次元フォトニック結晶をコアとする光ファイバの模式図である。

【図6】 第1バンドによる伝搬光の電場を示す模式図である。

【図7】 高次結合バンドによる伝搬光の電場を示す模式図である。

【図8】 位相格子を設けた1次元フォトニック結晶内の伝搬光を示す模式図である。

【図9】 入射側と出射側の両方に位相格子を設けた場合を示す模式図である。

【図10】 入射側に設置した位相格子の模式図である。

【図11】 1次元フォトニック結晶の両側に反射層を向けた場合の模式図である。

【図12】 1次元フォトニック結晶の両側に周期や構造の異なるフォトニック結晶を設置した場合の模式図である。

【図13】 閉じ込め用の1次元フォトニック結晶のバンド条件を説明する模式図である。

【図14】 本発明の構成の一例を示す模式図である。

【図15】 本発明の他の構成の一例を示す模式図である。

【図16】 2次元フォトニック結晶導波路の一構成を示す模式図である。

【図 17】 本発明を応用した 2 次元フォトニック結晶をコアとした光ファイバの模式図である。

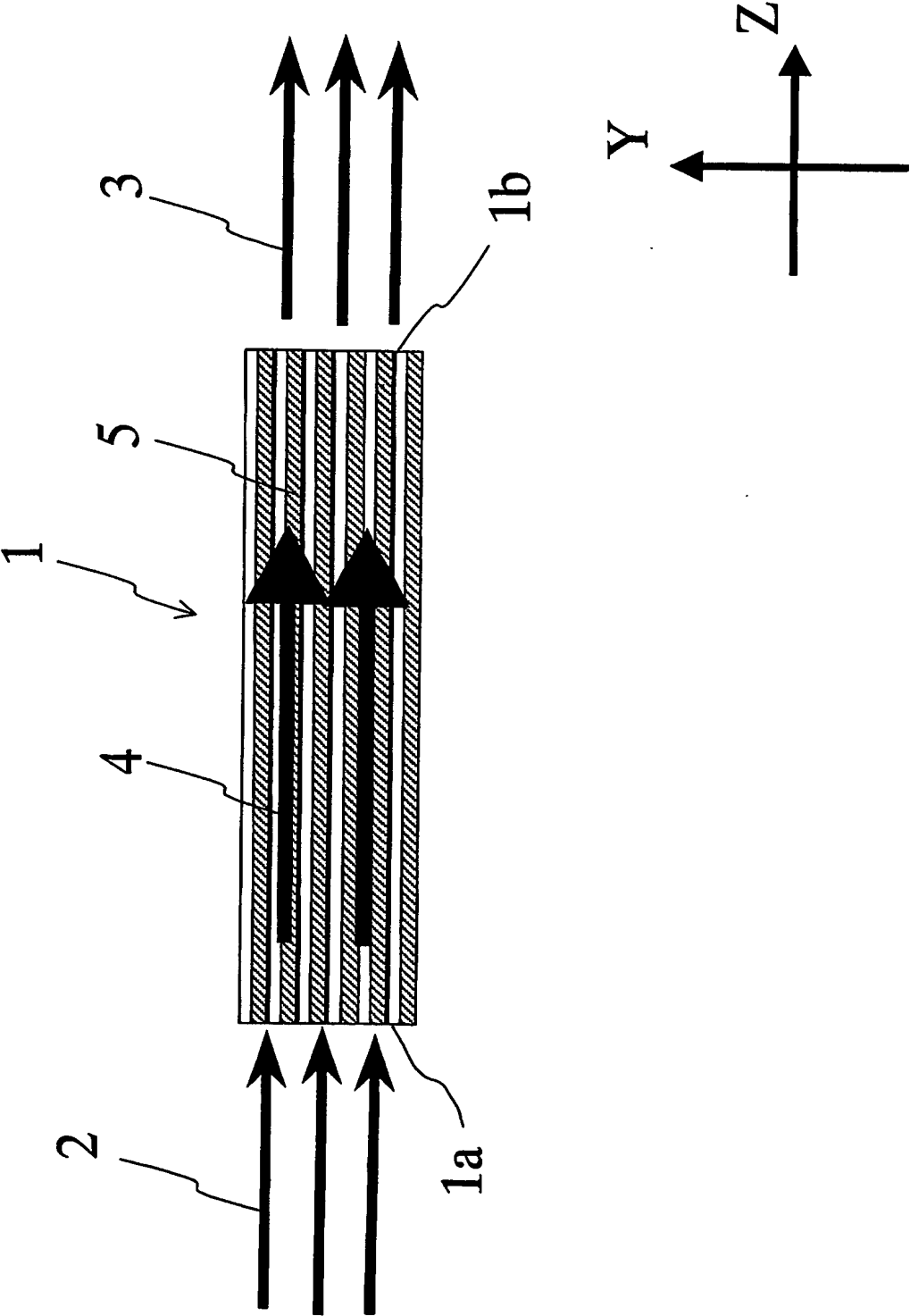
【図 18】 本発明を応用した同心円状 2 次元フォトニック結晶をコアとした光ファイバの模式図である。

【符号の説明】

- 1      1 次元フォトニック結晶
- 2      入射光
- 3      出射光
- 4      フォトニック結晶内の伝播光
- 5      周期的多層膜
- 6、26、46      位相格子
- 8      空間
- 9      位相変調された出射光
- 10      反射層
- 11      閉じ込め用のフォトニック結晶
- 13      基板
- 14      複屈折物質
- 16      1 次元フォトニック結晶光導波路
- 17      均質光導波路
- 20、30、40      2 次元フォトニック結晶光ファイバ
- 19、29      光導波路素子
- 21、41      2 次元フォトニック結晶コア
- 22、42      2 次元フォトニック結晶クラッド

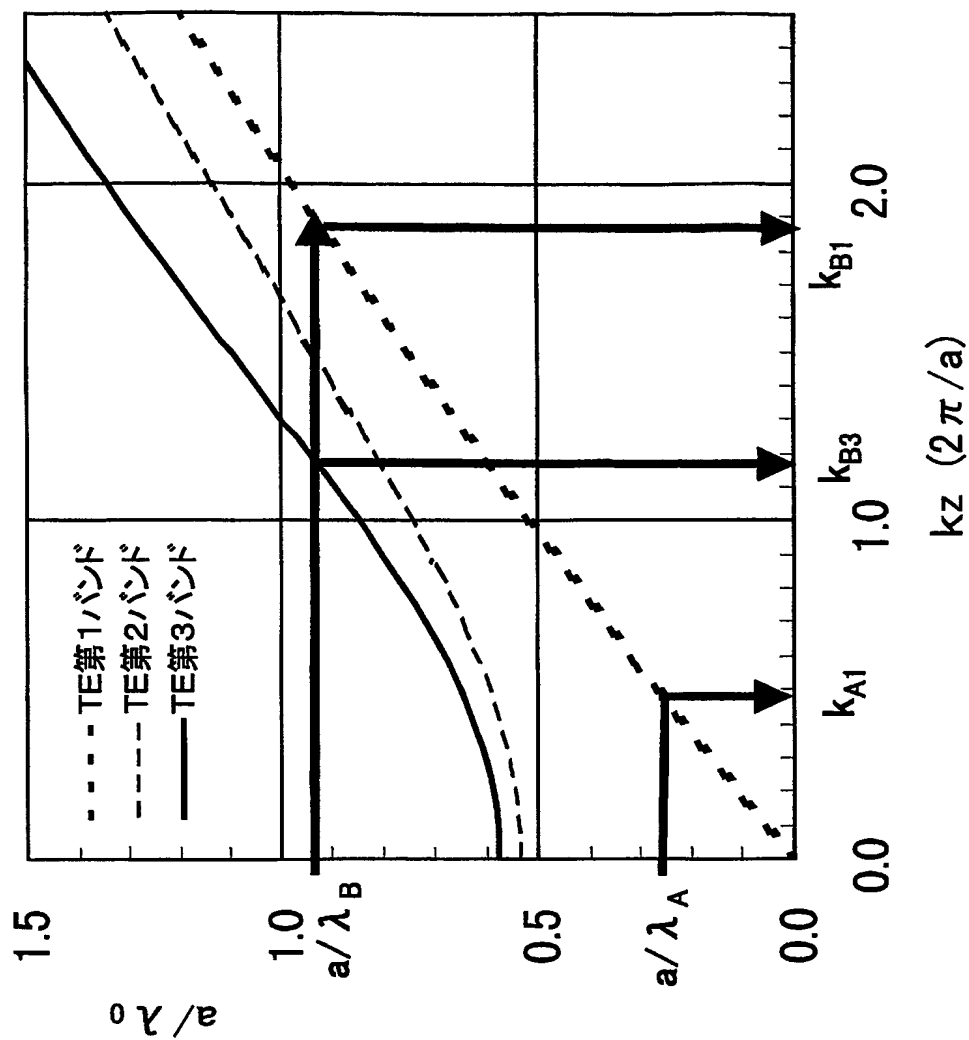
【書類名】 図面

【図 1】

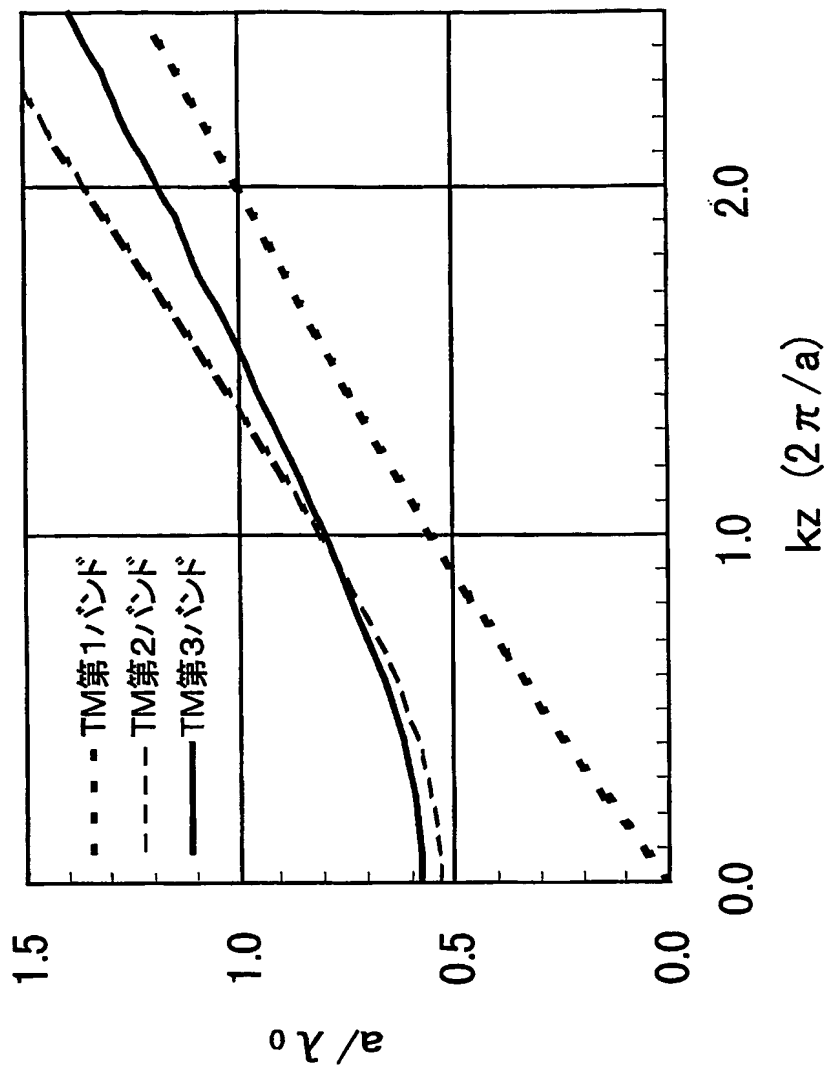




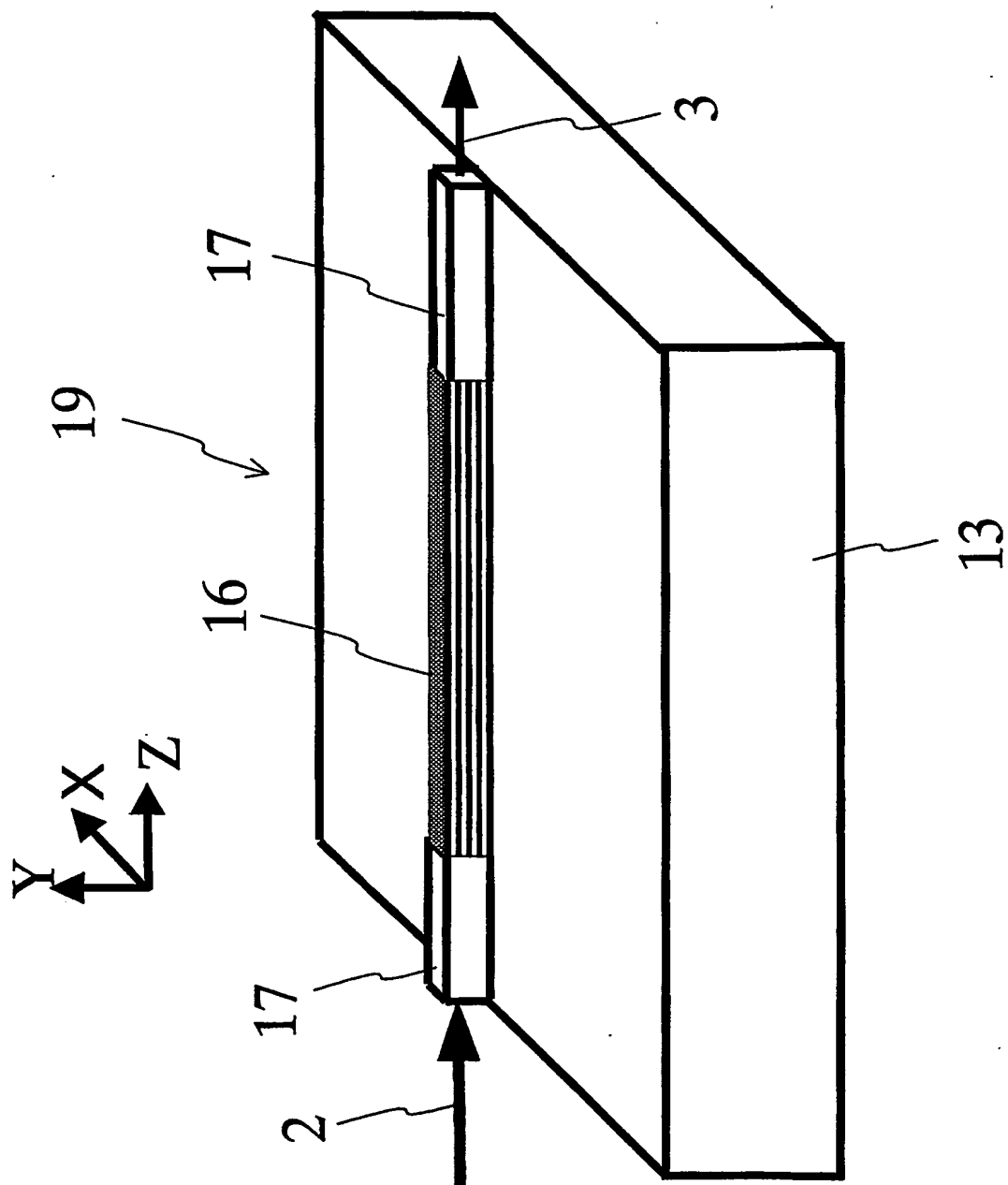
【図2】



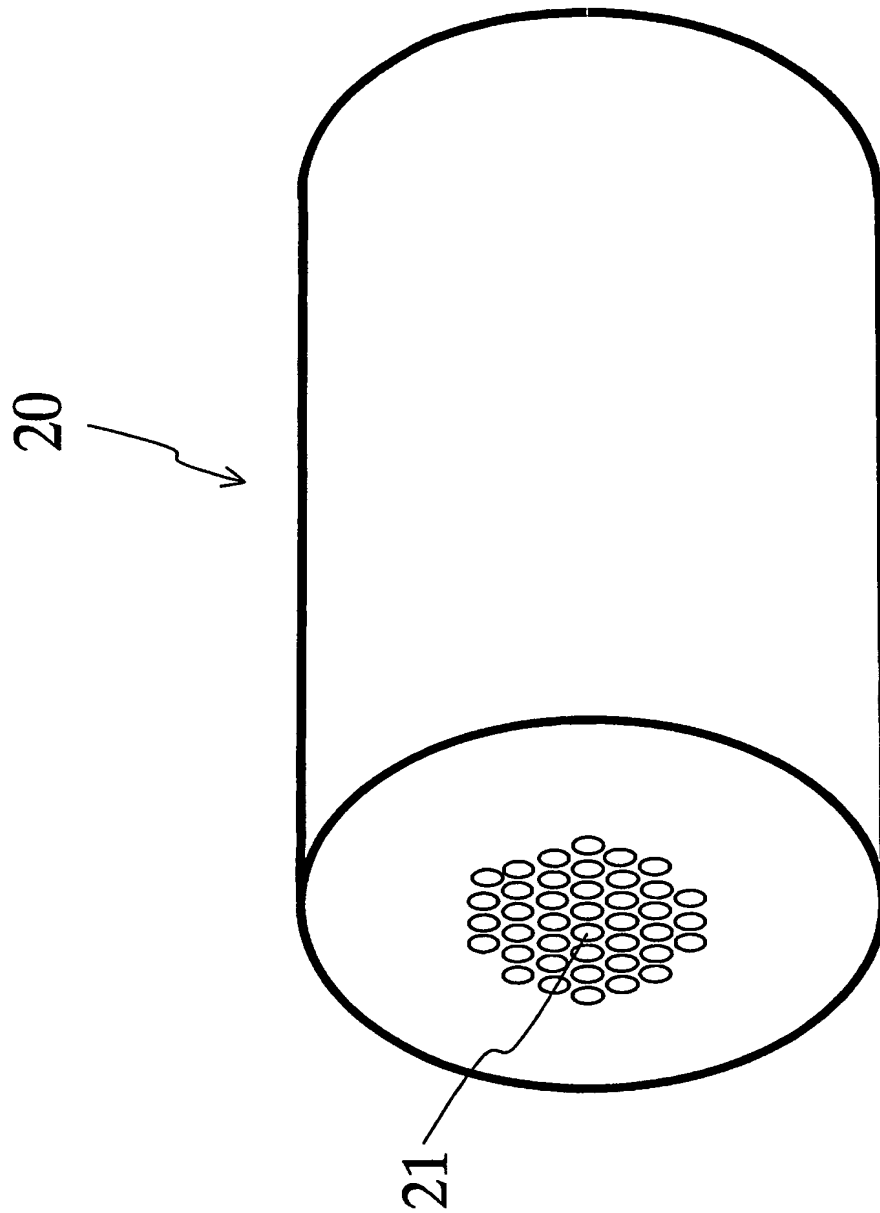
【図 3】



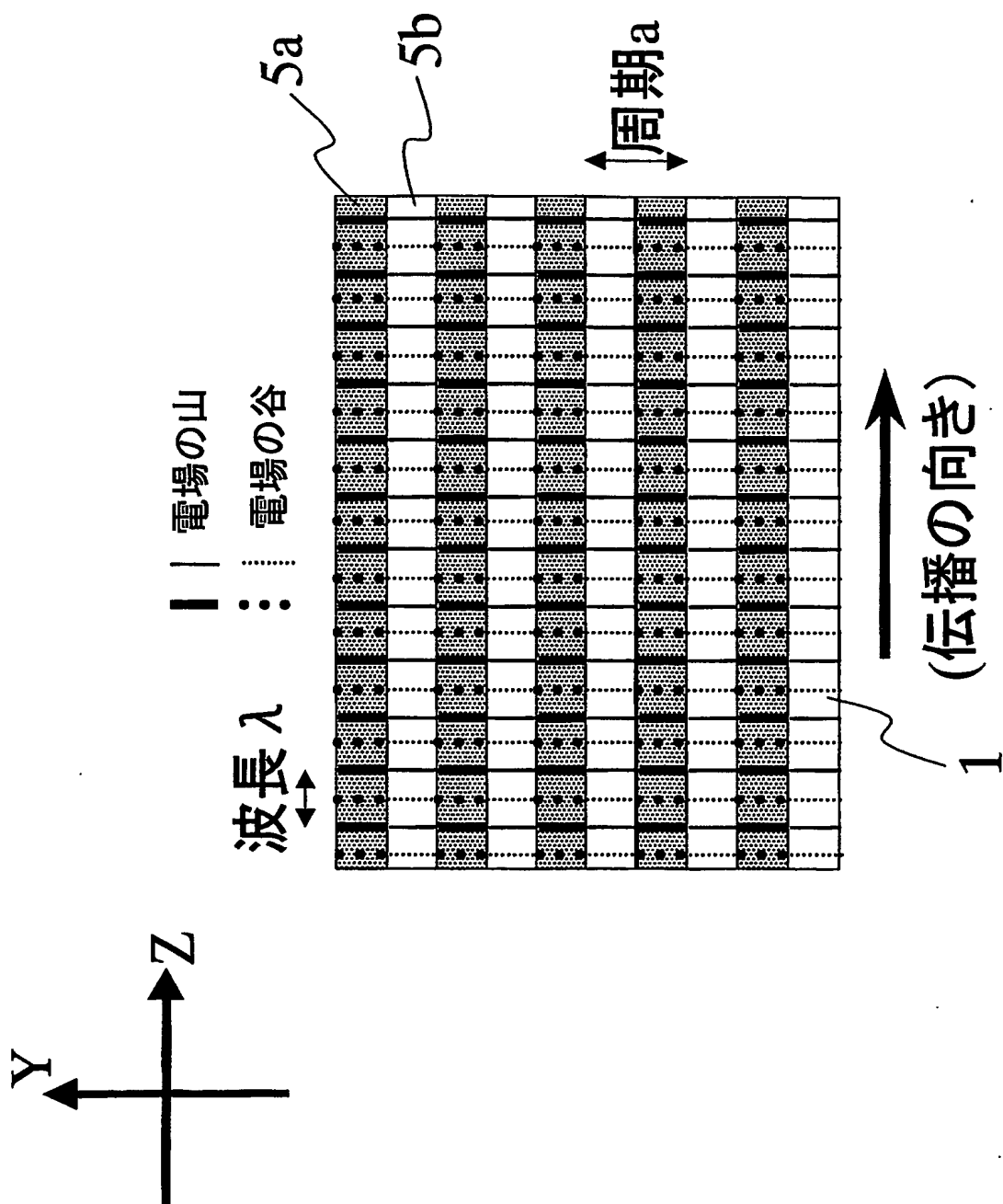
【図 4】



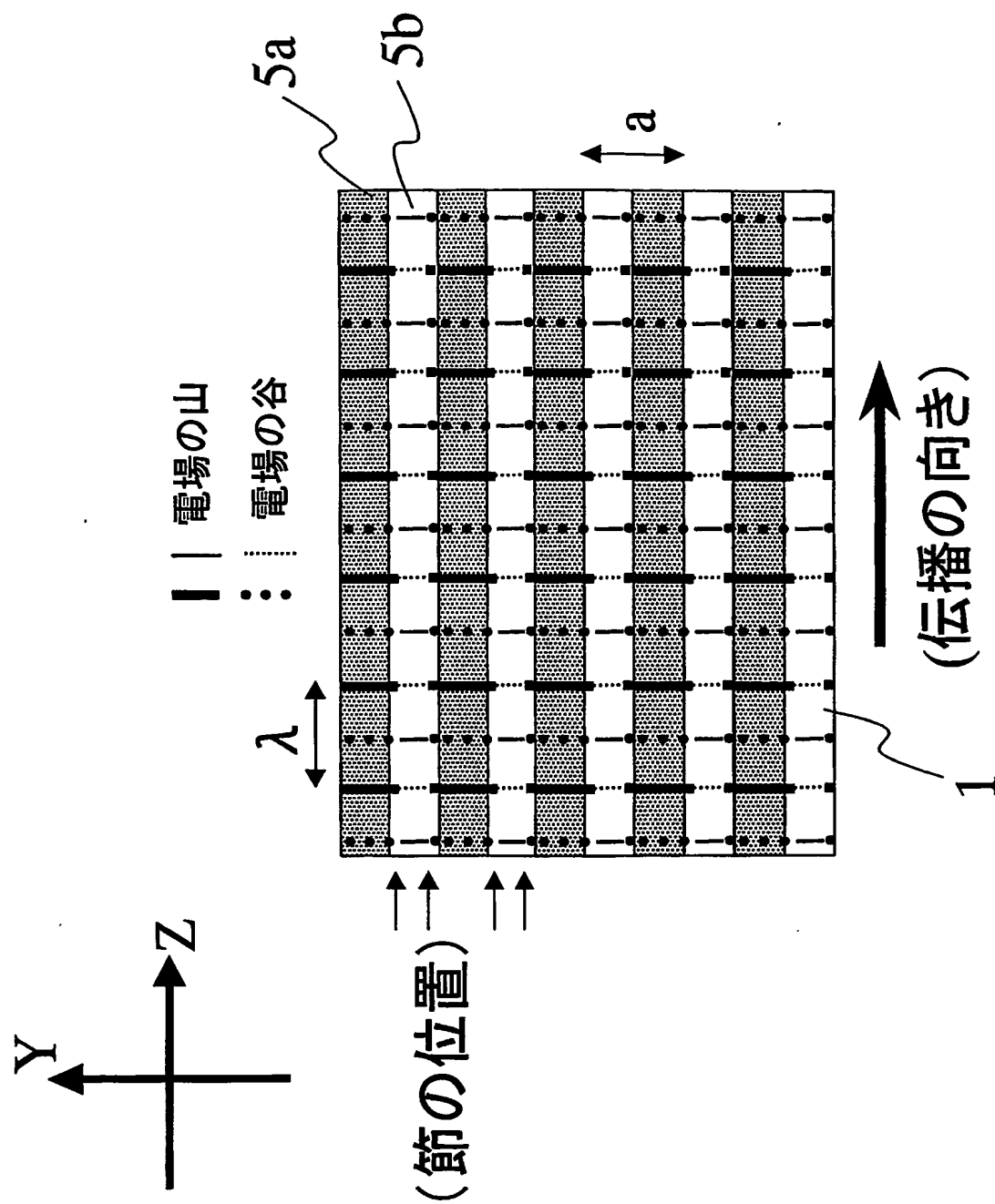
【図 5】



【図 6】

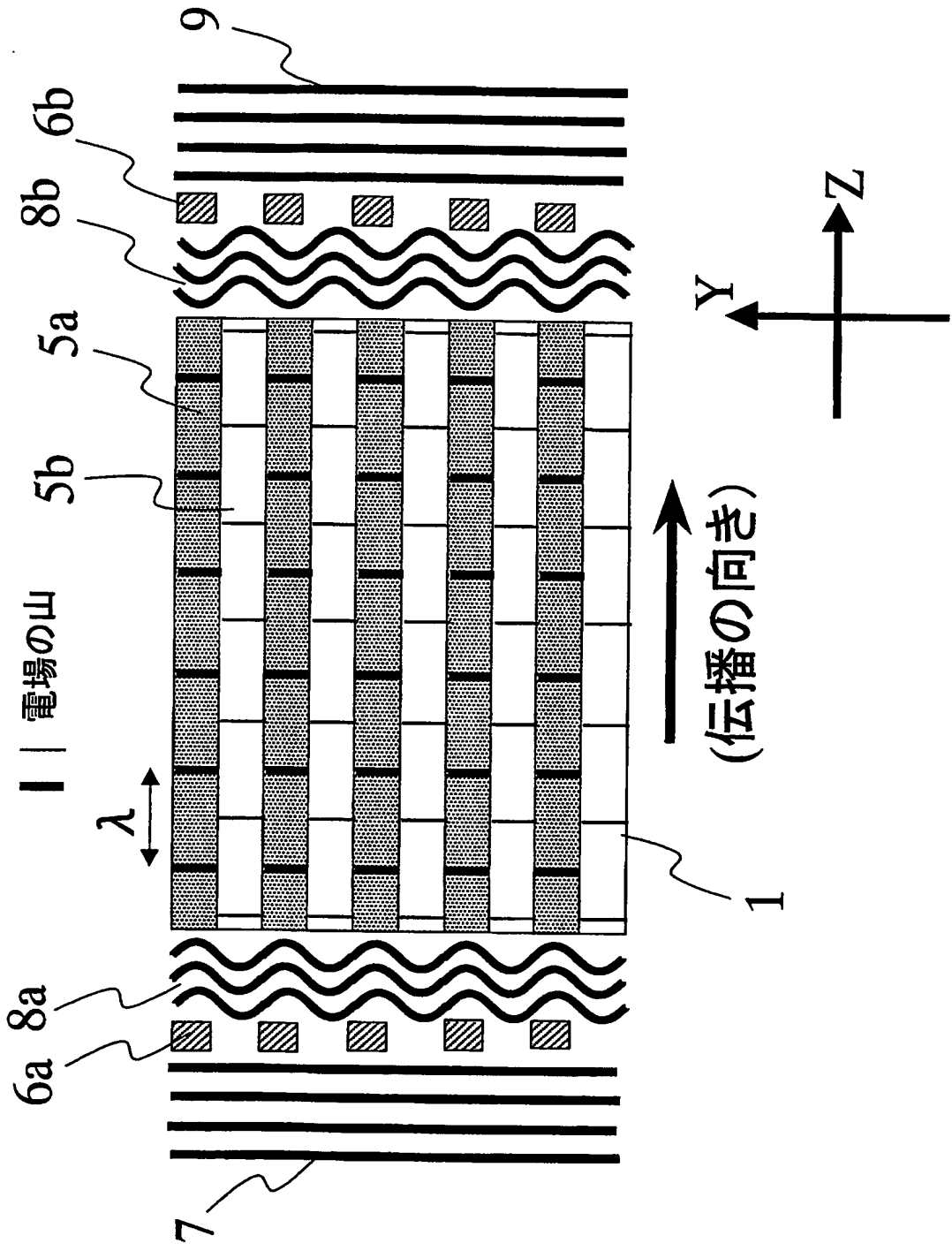


【図 7】



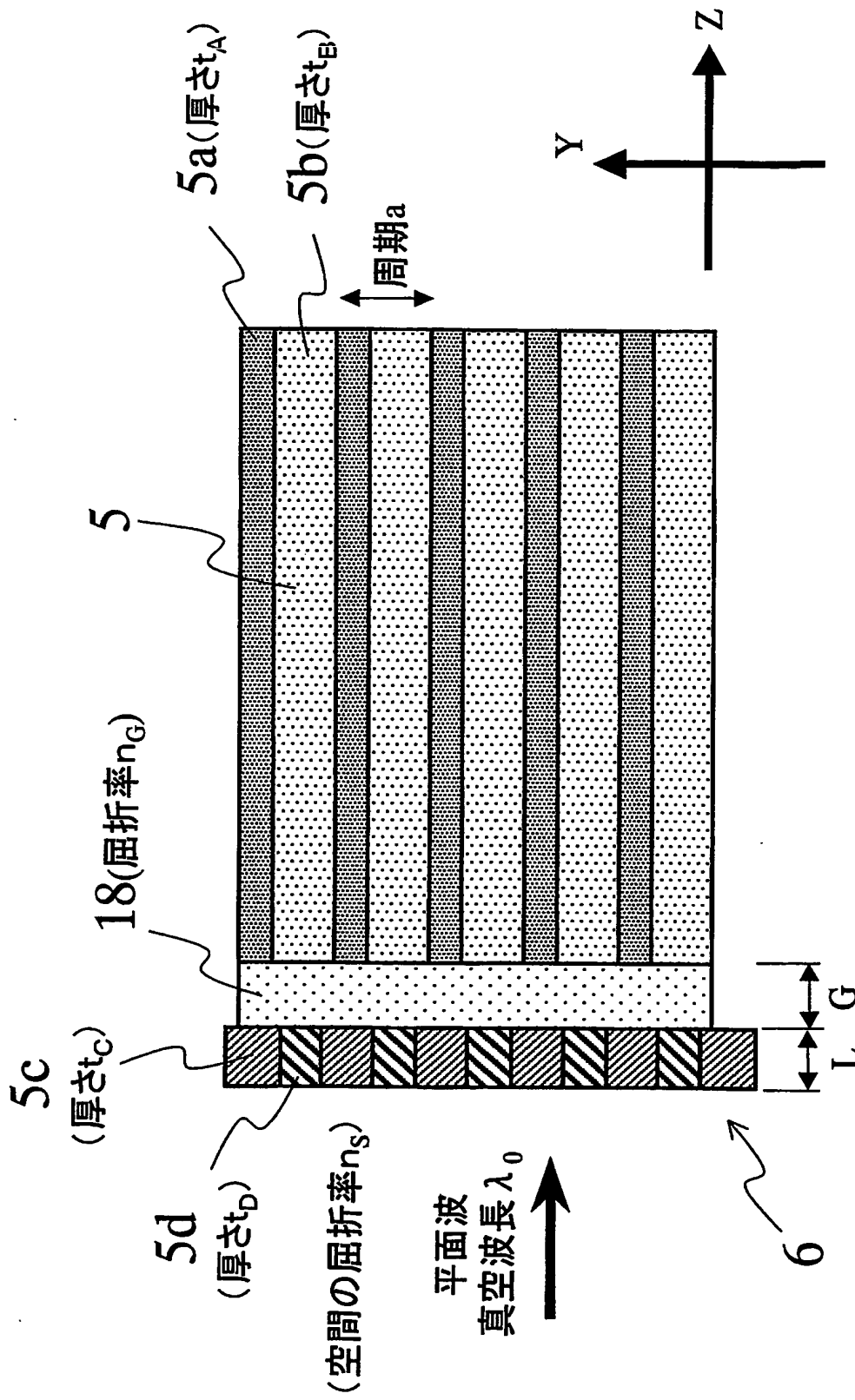


【図9】

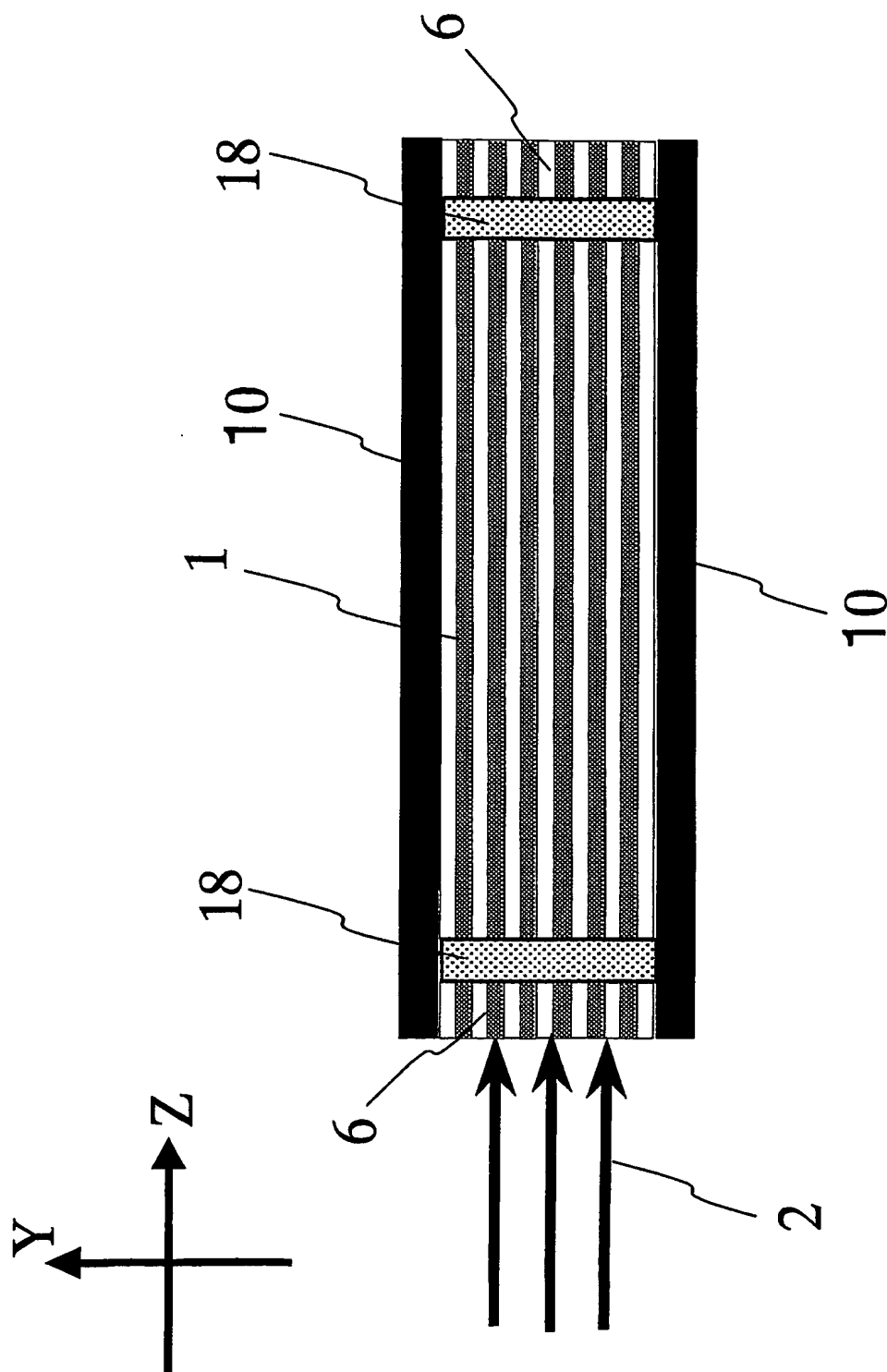


【図10】

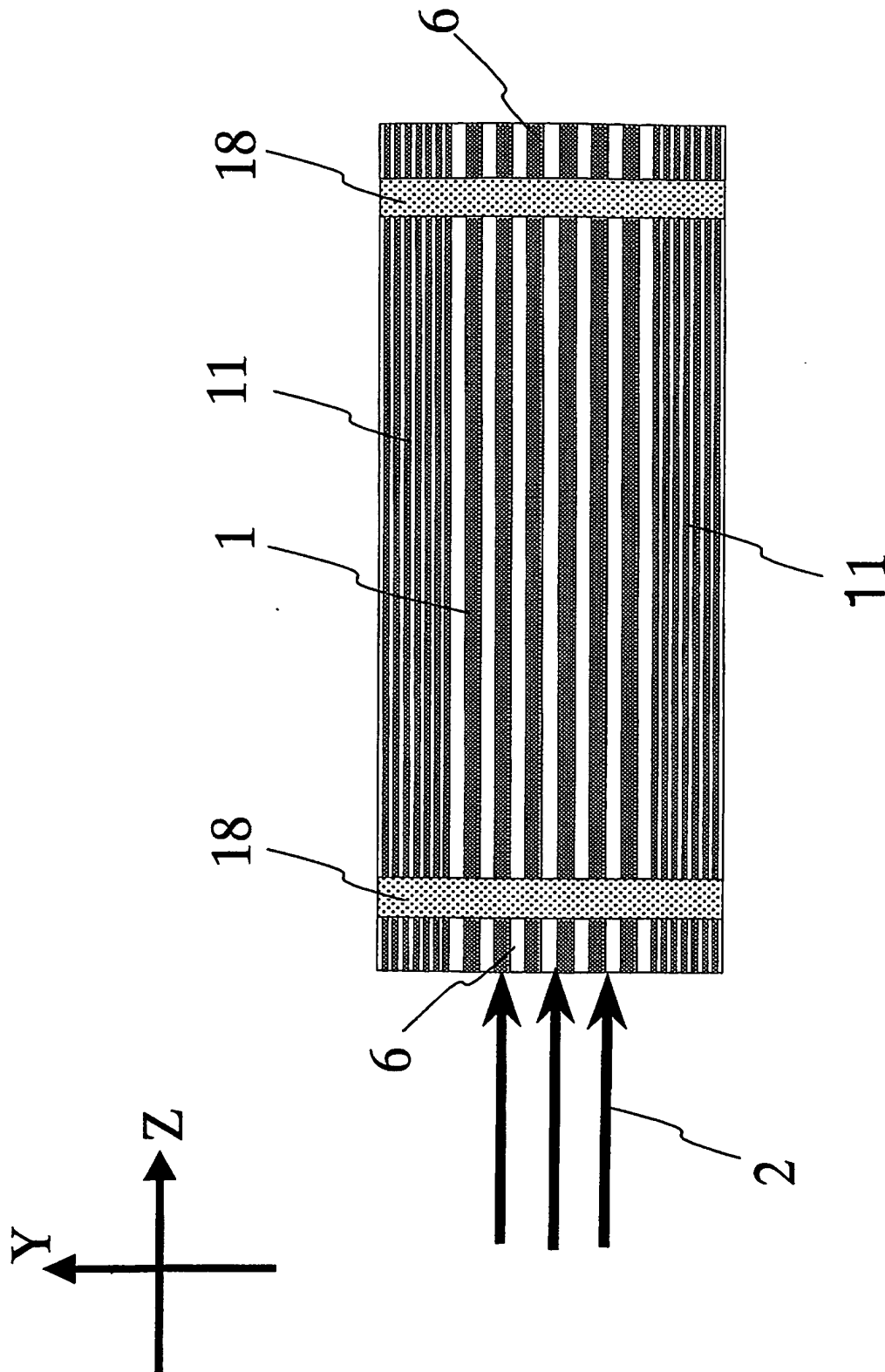




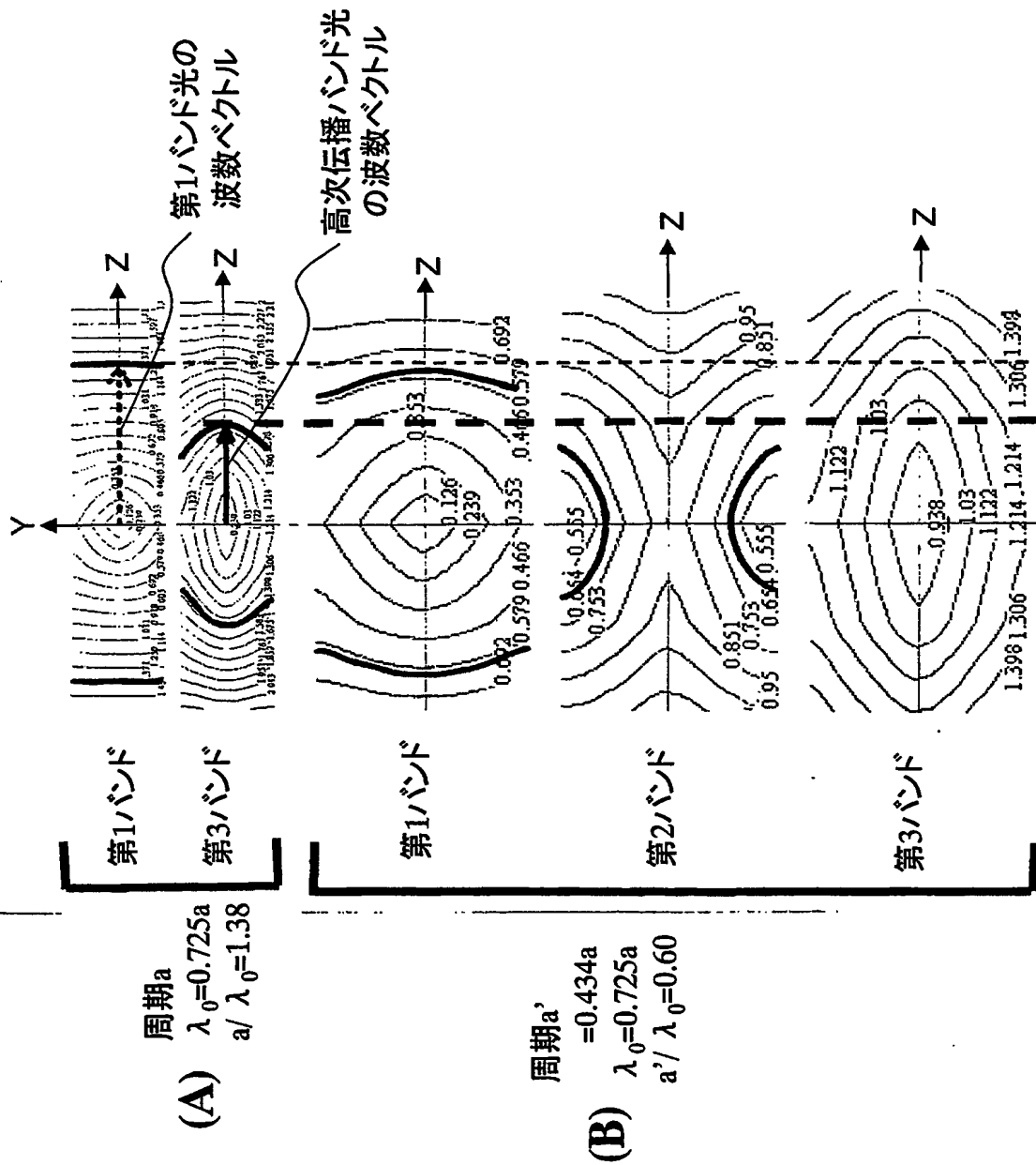
【図 11】



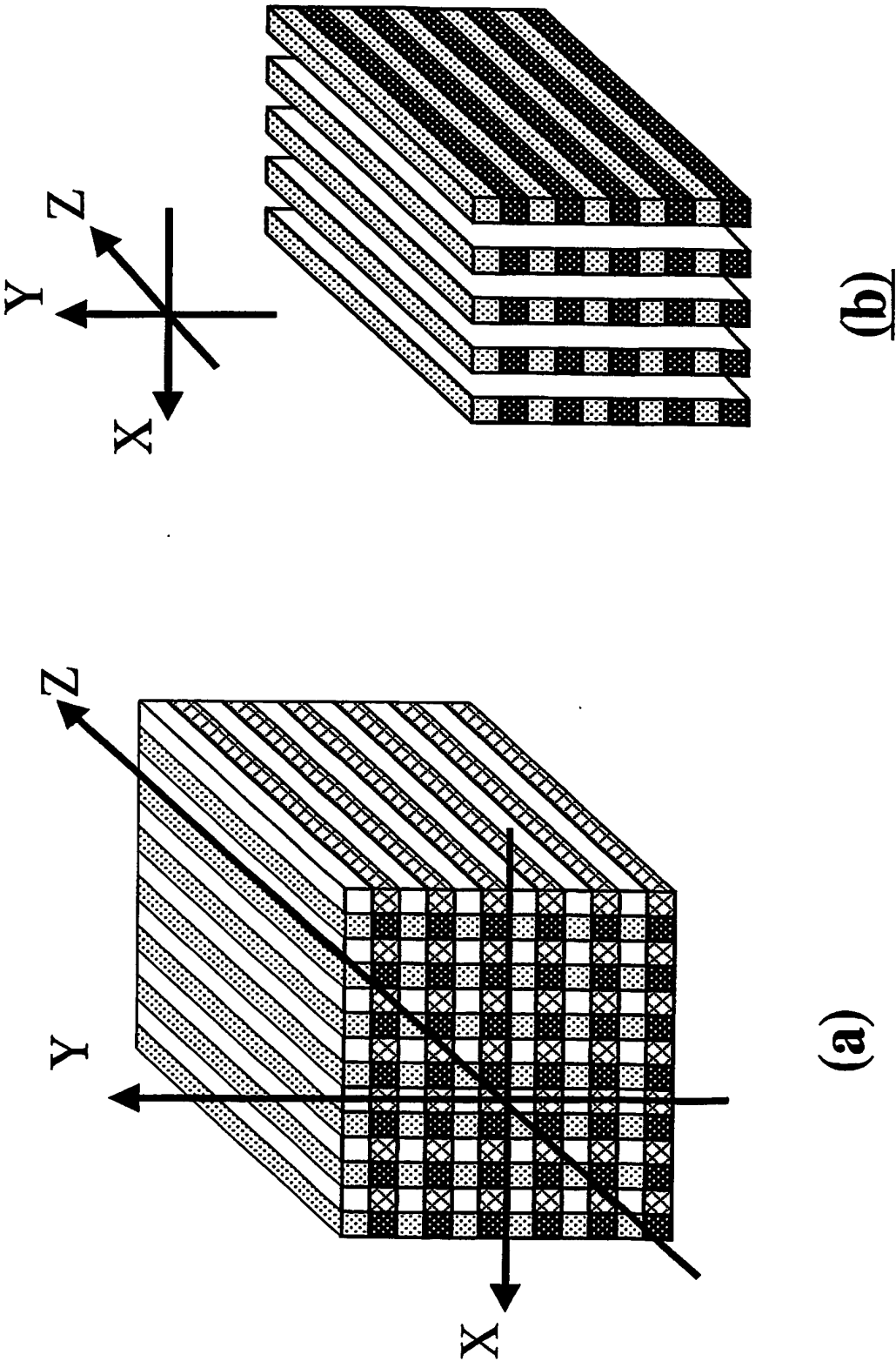
【図 12】



【図13】

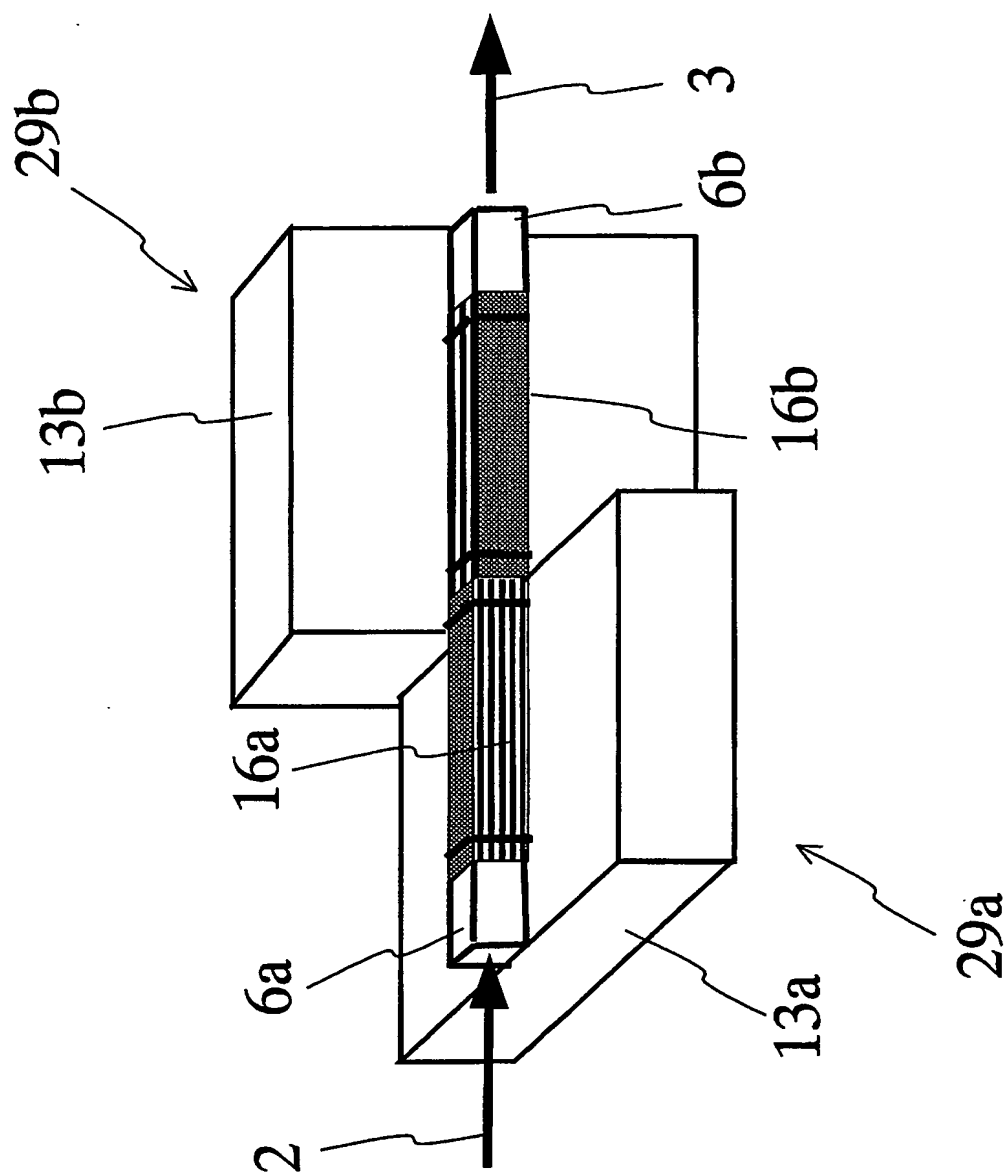


【図 14】

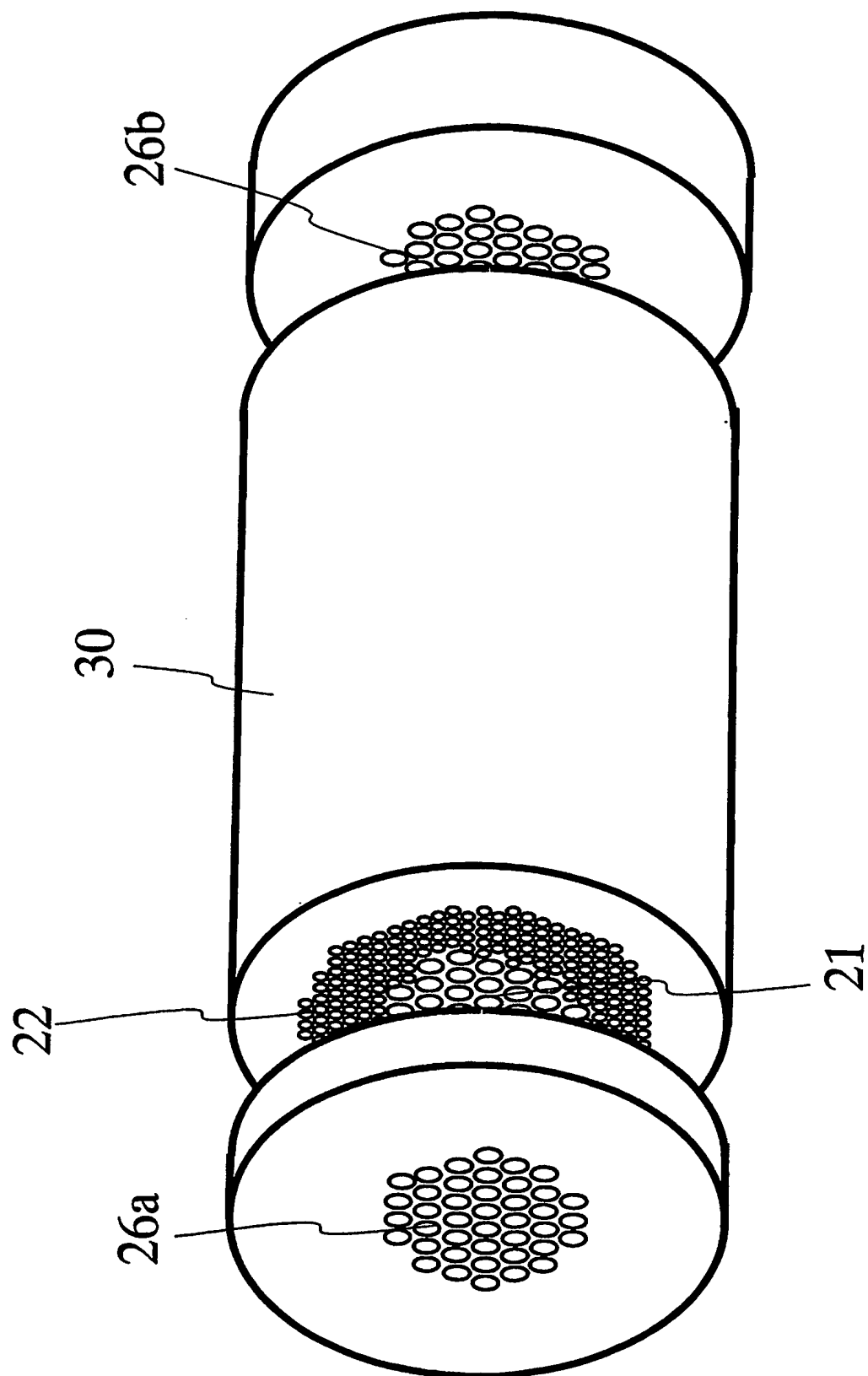




【図 16】

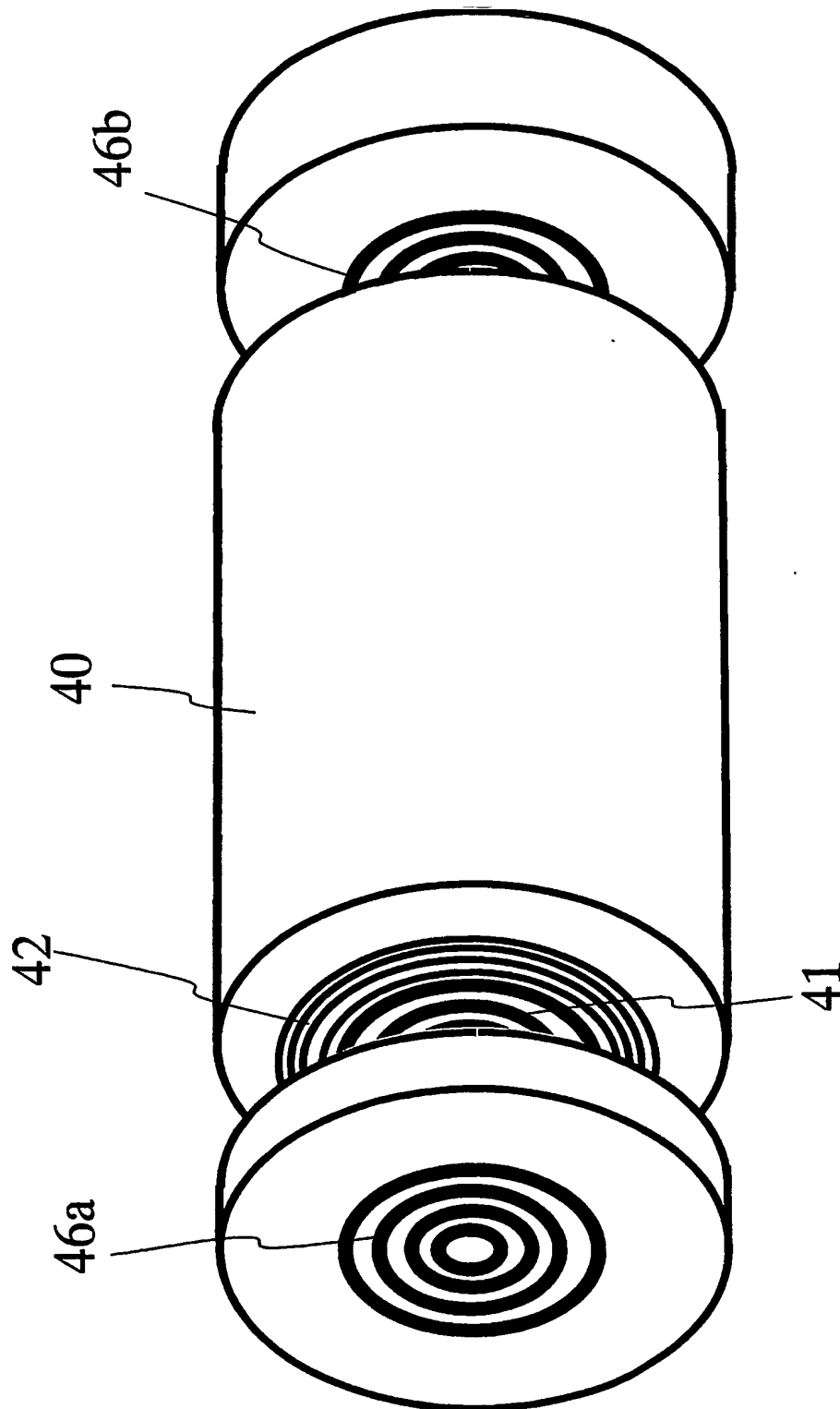


【図 17】





【図 18】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 現在提案されているホーリーファイバやフォトニック結晶ファイバでは、コア部分を伝搬する電磁波として、0次モードによる単一モード伝搬を利用しているが、これはコアの大きさや光ファイバ性能に対する制約条件となっている。本発明は、上記制約条件のない平板状光導波路または光ファイバを提供する。

【解決手段】 本発明のフォトニック結晶光導波路30は、電磁波の伝搬方向に垂直な少なくとも1方向に周期性を有し、電磁波の伝搬方向には周期性を有さないフォトニック結晶からなるコア21と、このコアに接し、伝搬する電磁波をコアに閉じ込める作用をなすクラッド22とからなり、その光入射面に近接もしくは接触して位相変調手段26a、26bを設けた。

【選択図】 図17

認定・付加情報

特許出願の番号	特願 2002-198337
受付番号	50200994661
書類名	特許願
担当官	金井 邦仁 3072
作成日	平成14年 7月10日

<認定情報・付加情報>

【提出日】 平成14年 7月 8日

次頁無

特願 2002-198337

出願人履歴情報

識別番号

[000004008]

1. 変更年月日

1990年 8月22日

[変更理由]

新規登録

住 所

大阪府大阪市中央区道修町3丁目5番11号

氏 名

日本板硝子株式会社

2. 変更年月日

2000年12月14日

[変更理由]

住所変更

住 所

大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号

氏 名

日本板硝子株式会社

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**